

ОБРАЗОВАНИЕ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ДИСКОВ В КОЛЛАПСИРУЮЩИХ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКАХ

Н. С. Каргальцева^{1,2}, А. Е. Дудоров^{1,2}, С. А. Хайбрахманов^{1,2}, С. Ю. Парфенов¹

¹Уральский федеральный университет, ²Челябинский государственный университет

С помощью двумерного численного МГД-кода ENLIL исследуются изотермические стадии коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков. Расчеты показывают, что в процессе изотермического коллапса образуется иерархическая структура: уплотненная оболочка облака, внутри которой находится первичный магнитостатический диск. Исследуется зависимость характеристик (размер, масса, угловой момент) первичного диска от начальных тепловой, магнитной и вращательной энергий. Для определения наблюдательных проявлений первичных дисков на основе результатов численного моделирования рассчитываются средние яркостные температуры облаков в линии NH_3 (2,2).

FORMATION AND OBSERVATIONAL FEATURES OF PRIMARY DISCS IN COLLAPSING PROTOSTELLAR CLOUDS

N. S. Kargaltseva^{1,2}, A. E. Dudorov^{1,2}, S. A. Khaibrahmanov^{1,2}, S. Yu. Parfenov¹

¹Ural Federal University, ²Chelyabinsk State University

We perform numerical MHD simulations of the isothermal collapse of magnetic rotating protostellar clouds to investigate initial conditions for protostellar disks formation. The simulations show that a hierarchical structure of the cloud is formed during the isothermal collapse: a flattened cloud envelope with a primary magnetostatic disk inside. The first core forms inside the primary disk further. We investigate the dependence of the characteristics (size, mass, angular momentum) of the envelope and primary disk on the initial thermal, magnetic, and rotational energies. Based on the results of numerical simulation the average brightness temperature in the NH_3 line (2,2) is under construction.

Введение

Современное звездообразование происходит в ядрах межзвездных молекулярных облаков (в протозвездных облаках, ПЗО). В своей основополагающей работе [1] Ларсон показал, что коллапс ПЗО имеет резко неоднородный характер с образованием маломассивного ядра — протозвезды. Под действием электромагнитных и/или центробежных сил коллапсирующие облака принимают сплюснутую относительно поля и оси вращения форму [2]. Галли и Шу [3], а также Томисака [4] отметили образование внутри коллапсирующего облака транзитентных псевдодисков. Стадии аккреции оболочки на ядро облака, протозвезду, исследовались в работах [5, 6].

В настоящей работе исследуются изотермические стадии коллапса ПЗО до образования первого ядра. Численное моделирование выполняется с помощью двумерного МГД-кода Enlil [7]. При этом впервые показывается, что в центральной области коллапсирующего ПЗО формируются магнитостатические структуры — первичные диски (ПД) [8]. Важность исследования ПД обусловлена тем, что они существуют достаточно долго и могут являться предвестниками протозвездных дисков.

Ниже описываются основные результаты расчетов коллапса сферически симметричных ПЗО, находящихся в однородном магнитном поле, силовые линии которого параллельны оси

вращения. Облака имеют массу $M_0 = 10 M_\odot$ и температуру 20 К. Основными начальными параметрами модели являются отношение тепловой ε_t , магнитной ε_m и вращательной ε_w энергий к модулю гравитационной энергии. Производится сравнение характеристик динамического коллапса и квазистатического сжатия магнитных вращающихся облаков. На основе численных расчетов строятся спектры излучения молекулы аммиака для регистрации возможных наблюдаемых проявлений первичных дисков.

Динамика коллапса

В работе построены модели изотермического коллапса для сильно неравновесного облака, $\varepsilon_t = 0.3$, и облака, близкого к равновесию, $\varepsilon_t = 0.7$, с магнитным и вращательным параметрами $\varepsilon_m = 0.2$, $\varepsilon_w = 0.01$. Время измеряется в единицах динамической шкалы времени $t_{\text{fhw}} = t_{\text{ff}}(1 - \varepsilon_m - \varepsilon_w)^{-1/2}$, где t_{ff} – время свободного сжатия.

Численное моделирование показывает, что коллапсирующие облака быстрее сжимаются вдоль силовых линий магнитного поля и оси вращения, образуя сплюснутую оболочку, внутри которой формируется магнитостатический ПД. На рис. 1 показана двумерная структура сильно неравновесного облака (а) и облака, близкого к равновесию (б) к моменту образования непрозрачной области. Верхние панели (I) показывают структуру оболочки облака, нижние (II) — структуру ПД. Граница оболочки облака (голубая линия) определяется как контактный разрыв с межзвездной средой. Граница ПД (зеленая линия) определяется по скачку в профилях скорости и плотности, на котором происходит резкое уменьшение скорости от сверхзвуковой практически до нуля. Панели II на рис. 1 показывают, что в случае сильно неравновесного облака образуется геометрически тонкий диск, в то время как в квазистатическом случае первичный диск является геометрически толстым во внешней части.

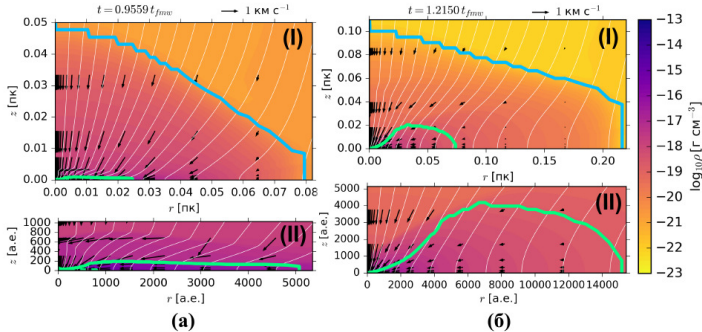


Рис. 1. Двумерное распределение плотности (цветная заливка), скорости (стрелки), магнитного поля (белые линии) коллапсирующего неравновесного облака $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_m = 0.2$, $\varepsilon_w = 0.01$ (а) и ПЗО, близкого к равновесию, $\varepsilon_t = 0.7$, $\varepsilon_m = 0.2$, $\varepsilon_w = 0.01$ (б) в моменты образования непрозрачной области при $t = 0.9559 t_{\text{fhw}}$ и $t = 1.2150 t_{\text{fhw}}$ соответственно. Панели (I) — оболочка облака. Панели (II) — увеличенная центральная область. Голубая линия показывает границу оболочки облака, зеленая — границу первичного диска

Согласно нашему моделированию степень уплощения оболочки протозвездного облака уменьшается с ε_m как $\varepsilon_m^{-1/2}$, что соответствует найденной ранее степенной зависимости в статье [9]. Масса ПД увеличивается с 4 до 78 % массы ПЗО при изменении ε_m в диапазоне от 0.2 до 0.7. Магнитное торможение уменьшает угловой момент оболочки на 5–30 %

в зависимости от $\varepsilon_m = (0.1\text{--}0.7)$. Зависимость характеристик оболочки облака и ПД от вращательного параметра ε_w будет рассмотрена в дальнейшем.

Наблюдательные проявления первичных дисков

Для расчетов, показанных на рис. 1, определена средняя яркостная температура ПЗО в линии NH_3 (2,2) в разные моменты времени (рис. 2). Первый столбец панелей соответствует моменту времени до образования ПД, второй столбец панелей показывает начальную стадию формирования ПД, в третьем столбце панелей — ПЗО в момент окончания расчета.

Средние яркостные температуры были получены на основе расчетов переноса излучения с помощью программного кода LIME [10] с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия. Для расчетов использовались скорости радиативных переходов с учетом сверхтонкого расщепления из базы данных VASTEL (является частью пакета CASSIS [11]) и скорости столкновительных переходов из базы данных BASECOL [12].

В расчетах динамического коллапса скорости аккреции и вращения облака больше, чем в расчетах квазистатического сжатия, из-за чего профили линий на рис. 2, *a* заметно уширены по сравнению с профилями линий на рис. 2, *б*. В случае динамического коллапса излучение ПД вносит существенный вклад в среднюю яркостную температуру. На границе ПД и оболочки облака существует область с большим градиентом скорости, где газ резко меняет свое движение с вертикального (вдоль силовых линий магнитного поля) на горизонтальное (рис. 1, *a* П). Наличие этой области выражается в пониженной средней яркостной температуре на скоростях $\approx \pm 0.5$ км/с при малых углах наклона i (рис. 2, *a*). В случае квазистатического сжатия (рис. 2, *б*) градиенты скорости на границе ПД и оболочки облака небольшие, поэтому излучение ПД несущественно влияет на спектральные линии NH_3 (2,2). Нужно отметить, что уплощение в центральных областях облака в моделях с магнитным полем существенно влияет на профили линии еще до момента времени, когда, согласно нашему критерию, в облаке возникает ПД.

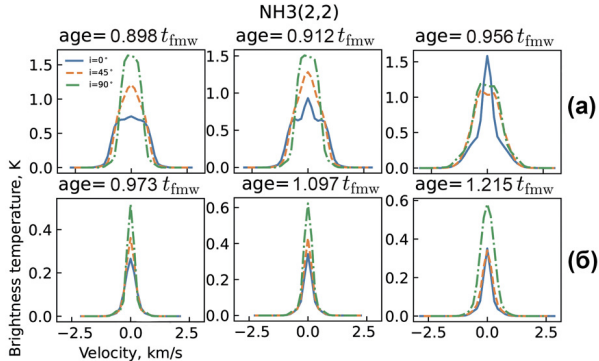


Рис. 2. Средняя яркостная температура в линии NH_3 (2,2) для разных углов наклона между лучом зрения и осью вращения облака, i , и разных этапов эволюции облака в долях t_{fmw} для расчетов на рис. 1

Закключение

Численные расчеты магнитных вращающихся ПЗО показывают, что степень сжатия оболочки уменьшается как $\varepsilon_m^{-1/2}$. При увеличении магнитного параметра ε_m от 0.2 до 0.7 масса ПД растет от 4 до 78 % массы ПЗО, полный угловой момент ПЗО уменьшается на 5—30 %. В процессе динамического коллапса формируются геометрически тонкие ПД, а в случае квазистатического сжатия — геометрически толстые ПД. Однако в квазистатическом случае в линии NH_3 (2,2) не наблюдаются проявления ПД из-за малой скорости движения вещества в облаке. В случае динамического коллапса наблюдается характерный трехгорбый спектр линии NH_3 (2,2) в экваториальном направлении. Можно сделать вывод, что на ранних стадиях звездообразования можно обнаружить проявление ПД в линиях NH_3 (2,2) в случае сильно неравновесных быстроколлапсирующих облаков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-10012).

Библиографические ссылки

- [1] *Larson Richard B.* Numerical calculations of the dynamics of collapsing proto-star // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1969. — Vol. 145. — P. 271.
- [2] *Scott E. H., Black D. C.* Numerical calculations of the collapse of nonrotating, magnetic gas clouds // Astrophys. J. — 1980. — Vol. 239. — P. 166–172.
- [3] *Galli Daniele, Shu Frank H.* Collapse of Magnetized Molecular Cloud Cores. I. Semianalytical Solution // Astrophys. J. — 1993. — Vol. 417. — P. 220.
- [4] *Tomisaka Kohji.* Collapse of Rotating Magnetized Molecular Cloud Cores and Mass Outflows // Astrophys. J. — 2002. — Vol. 575, № 1. — P. 306–326. astro-ph/0105527.
- [5] *Hennebelle P., Fromang S.* Magnetic processes in a collapsing dense core. I. Accretion and ejection // Astron. Astrophys. — 2008. — Vol. 477, № 1. — P. 9–24. 0709.2886.
- [6] *Zhao Bo, Caselli Paola, Li Zhi-Yun, Krasnopolsky Ruben.* Decoupling of magnetic fields in collapsing protostellar envelopes and disc formation and fragmentation // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2018. — Vol. 473, № 4. — P. 4868–4889. 1706.06504.
- [7] *Dudorov A. E., Zhilkin A. G., Kuznetsov O. A.* Numerical Simulations of the Astrophysical MHD Flows // Numerical Astrophysics / ed. by Shoken M. Miyama, Kohji Tomisaka, Tomoyuki Hanawa : Astrophysics and Space Science Library. — 1999. — Vol. 240. — P. 389.
- [8] *Khaibrakhmanov S. A., Dudorov A. E., Kargaltseva N. S., Zhilkin A. G.* Simulations of the isothermal collapse of magnetic protostellar clouds // In prep. — 2021.
- [9] *Dudorov A. E., Sazonov Iu. V.* Hydrodynamic collapse of interstellar clouds. 2. The role of magnetic fields. // Nauchnye Informatsii. — 1982. — Vol. 50. — P. 98–112.
- [10] *Brinch C., Hogerheijde M. R.* LIME - a flexible, non-LTE line excitation and radiation transfer method for millimeter and far-infrared wavelengths // Astron. Astrophys. — 2010. — Vol. 523. — P. A25. 1008.1492.
- [11] *Vastel C., Bottinelli S., Caux E. et al.* CASSIS: a tool to visualize and analyse instrumental and synthetic spectra. // SF2A-2015: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics. — 2015. — P. 313–316.
- [12] *Dubernet M. L., Alexander M. H., Ba Y. A. et al.* BASECOL2012: A collisional database repository and web service within the Virtual Atomic and Molecular Data Centre (VAMDC) // Astron. Astrophys. — 2013. — Vol. 553. — P. A50.